

長方形断面水平水路における自由跳水の流況区分

日大院理工 学生会員 ○持田 俊 日大理工 正 会 員 安田 陽一
 日大理工 正 会 員 高橋 正行 日大理工 フェロー 大津 岩夫

はじめに

長方形断面水平水路に形成される跳水の流況は跳水始端のフルード数 F_1 によって変化することが一般的に知られている¹⁾。従来、跳水の流況は波状跳水・弱跳水・動揺跳水・定常跳水・強跳水に区分されている¹⁾。最近の著者らの研究によると、跳水の流況は跳水始端のフルード数 F_1 ばかりではなく、レイノルズ数 Re 、跳水始端での乱流境界層の発達状態および跳水始端のアスペクト比によって変化する^{2)~5)}。跳水の各流況が形成されるための水理条件を知ることがダムや堰の減勢工の設計ばかりでなく、小規模水路の水理設計、流水美デザインの設計などに役立つものと考えられる。ここでは、跳水の流況を特徴づけ、各流況の形成条件を明らかにした。

表1 実験条件

| $F_1 = V_1 / \sqrt{gh_1}$ | $Re = V_1 h_1 / \nu$ | B/h_1 | 乱流境界層の発達状態 |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|
| $1.6 \leq F_1 \leq 6.5$ | $35,000 \leq Re \leq 120,000$ | $10.0 \leq B/h_1 < 30.0$ | Fully developed inflow |

実験

スルースゲート下流で形成される跳水の流況を検討するため、水路幅 $B=80\text{cm}$ および水路幅 $B=40\text{cm}$ の長方形断面水平水路を用いた。また、跳水の始端の水深および跳水の位置については上・下流側のゲートを用いて調節を行い、跳水はデジタルビデオカメラで記録した。実験条件を表1に示す。表1において、 h_1 は跳水始端での平均水深、 V_1 は跳水始端での断面平均流速、 ν は動粘性係数である。跳水始端は乱流境界層が十分に発達した断面(Fully developed inflow)に位置させ、縮流部から乱流境界層が水面に達したばかりの断面までの距離 x_{cp} を算定し⁶⁾、縮流部から $2x_{cp}$ の断面に跳水始端を位置させた。

跳水始端の乱流境界層が十分に発達した

(Fully developed inflow) の場合の流況

乱流境界層が十分に発達した断面に跳水始端がある場合(Fully developed inflow)、跳水の流況は跳水始端のフルード数 F_1 およびレイノルズ数 Re によって変化する^{2),3),5)}。図1は $6.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ 、 $10 \leq B/h_1 < 30$ の場合の跳水の流況を示したものである。実験によると $Re \geq 60,000$ の場合、跳水の流況区分に対するレイノルズ数 Re の影響は無視できる程小さいことが示された。ここでは、 $Re \geq 60,000$ の場合を対象に各流況の特徴を以下に説明にする。

$F_1 \leq 1.7$ の場合、流況は定常的でスムーズな波状水面を有し、砕波することはない。また、lateral shock wave の形成も認められる。すなわち波状跳水(Nonbreaking undular jump)が形成される⁵⁾。

$1.7 < F_1 \leq 2.1$ の場合、定常的な波状水面が形成されるが、波状水面の第1波目中央部で小規模な表面渦が形成される。また、lateral shock wave の形成も認められる。すなわち、Breaking undular jump(砕波した波状跳水)⁴⁾が形成される。また、第一波目の山頂部の高さを h_{wc} 、Bélanger equation より算定した常流の対応水深を h_2 とし、

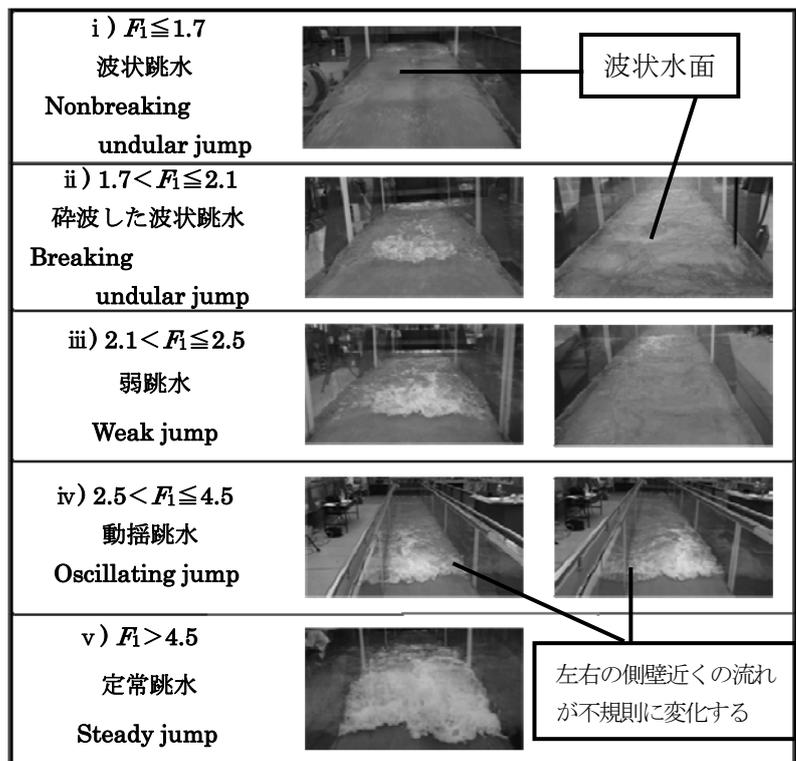


図1 $60,000 \leq Re \leq 120,000$ における跳水の流況 (Fully developed inflow の場合 $10 \leq B/h_1 < 30, 1.6 \leq F_1 \leq 6.5$)

キーワード：跳水,フルード数,レイノルズ数,乱流境界層,フルードの相似則

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14; Tel.&Fax.: 03-3259-0409;E-mail:yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

$(h_{wc}-h_2)/h_2 \geq 5\%$ の場合を **Breaking undular jump** と定義している⁵⁾。

$2.1 < F_1 \leq 2.5$ の場合, 跳水始端でのフルード数が $F_1 > 2.1$ になると, 波状水面の凹凸は小さくなり ($(h_{wc}-h_2)/h_2 < 5\%$), 水路中央で小規模な表面渦が形成される. すなわち, 弱跳水 (**Weak jump**) が形成される. Bradley and Peterka¹⁾ (USBR)によると, $1.7 < F_1 \leq 2.5$ の範囲で弱跳水が形成されると記述されている.

$2.5 < F_1 \leq 4.5$ の場合, 表面渦を伴った跳水が形成されるが, 水路の両側壁側近くで跳水に流入した流れの向きが時間の経過に伴い不規則に変化する. すなわち, 動揺跳水 (**Oscillating jump**) が形成される. USBR¹⁾によると, $2.5 < F_1 \leq 4.5$ の範囲で形成される跳水が動揺跳水 (**Oscillating jump**) と呼ばれているのは, 両側壁側近くでの流れの向きの不安定さによるものと考えられる.

$F_1 > 4.5$ (本実験では $F_1 \leq 8.0$ を対象) の場合, 動揺跳水のような両側壁側近くでの跳水に流入した流れの不安定さは見られず, 安定した表面渦が形成される跳水となる. すなわち, 定常跳水 (**Steady jump**) が形成される. このように跳水は安定し下流水面が穏やかになることから, 従来, 定常跳水 (**Steady jump**) と呼ばれたものと考えられる.

$35,000 \leq Re \leq 120,000$, $10 \leq B/h_1 < 30$ の場合の各流況の形成範囲を図 2 に示す.

図 2 に示されるように, $Re \geq 60,000$ の場合, 各流況の境界はレイノルズ数 Re の影響を受けず, フルード数 F_1 のみによって定まる. この場合, **Weak jump** と **Oscillating jump** との境界および **Steady jump** の形成領域の下限を示すフルード数は USBR¹⁾の実験 ($6.0 \times 10^4 \leq Re \leq 6.6 \times 10^5$) と同様な結果を示す.

$Re < 60,000$ の場合, 図に示されるように, レイノルズ数 Re の減少に伴い, 各流況の境界を示すフルード数 F_1 の値が大きくなる. これは, 各流況の形成に対して粘性の影響が大きくなったためと考えられる. すなわち, $Re < 60,000$ の場合, 各流況の跳水形成に対するレイノルズ数 Re の影響が無視できなくなってくる.

まとめ

長方形断面水平水路における跳水の流況について表 1 に示す条件のもとで系統的に検討した. 跳水の流況は波状跳水 (**Nonbreaking undular jump**), 砕波した波状跳水 (**Breaking undular jump**), 弱跳水 (**Weak jump**), 動揺跳水 (**Oscillating jump**), 定常跳水 (**Steady jump**) に分けられ(図 1), 各流況の特徴を示すことができた. また, 各流況の形成条件を図 2 のように示すことができた. $Re \geq 60,000$ において, 跳水の流況は跳水始端のフルード数 F_1 のみによって変化する. $Re < 60,000$ において, 跳水の流況はフルード数 F_1 およびレイノルズ数 Re によって変化する. すなわち, $Re < 60,000$ において各流況の形成条件に対して, レイノルズ数が影響することを明らかにした.

参考文献

- 1) Bradley, J.N. and Peterka, A.J., The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper1401, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.83,no.HY5, pp.1-24, October, 1957.
- 2) 持田, 安田, 大津: 長方形断面水路における跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響 第 63 回年次学術講演会, 第 2 部門, 土木学会, 2008 年, CD-ROM.
- 3) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahashi, M., Discussion of Particle Image Velocity Measurements of Undular and Hydraulic Jumps, ASCE, Vol.135, No.5, 2009, pp.434-436.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Reply to the discussion of Hydraulic Condition for Undular-Jump Formations, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.40, No.3, 2002, pp.382-384.
- 5) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H., Flow conditions of Undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.129, No.12, 2003, pp.948-955.
- 6) Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Characteristics of supercritical flow below sluice gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.3, 1994, pp.332-346.

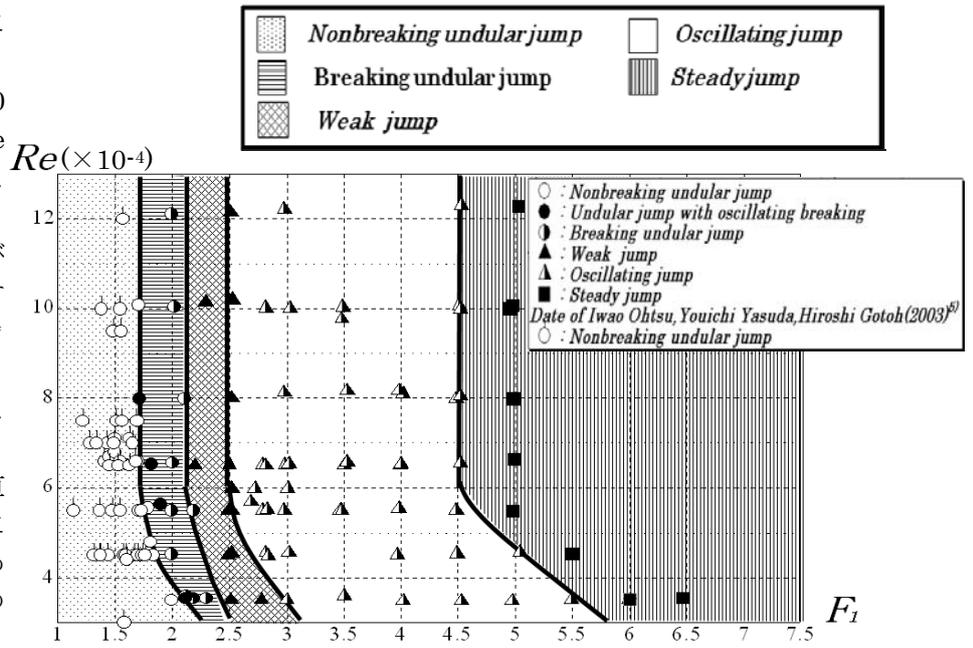


図 2 跳水の各流況の形成領域(Fully developed inflow)